

**HOMOGENEIZAÇÃO DO FLUXO EM CONCENTRADORES SOLARES DE ELEVADA INTENSIDADE****Pereira J.C.G.\*, Fernandes J.C.\*\*, Rodríguez J.\*\*\*, Guerra Rosa L.\*\***

\* Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, [jose.carlos.pereira@tecnico.ulisboa.pt](mailto:jose.carlos.pereira@tecnico.ulisboa.pt)

\*\* IDMEC, DEM, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

\*\*\* Plataforma Solar de Almería, CIEMAT, Apartado 22, E-04200 Tabernas (Almería), Espanha

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2024>

**RESUMO**

Quer as medições experimentais realizadas com radiómetros, quer as simulações ópticas já efectuadas, evidenciam a dificuldade de obtenção de fluxos homogéneos de radiação solar, nos atuais fornos solares de elevada concentração. Apesar de se recorrer a dispositivos ópticos denominados homogeneizadores do fluxo da radiação, os atuais fornos solares não conseguem contornar satisfatoriamente este problema. Neste trabalho propõe-se uma solução baseada na utilização de concentradores solares com dois parabolóides, um grande e um pequeno, com o mesmo ponto focal. De acordo com as nossas simulações de óptica geométrica, a dupla reflexão pelos dois parabolóides permite obter radiação homogénea numa região central circular com dimensões adequadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Optimização de Fornos Solares, Homogeneizador de Fluxo Solar, Modelação Óptica, Simulações Ray-Tracing

**ABSTRACT**

Both experimental measurements made with radiometers and optical modelling studies show the difficulty to obtain homogeneous fluxes of concentrated solar radiation in the existing high-concentration solar furnaces. Despite the use of optical devices so-called radiation homogenizers, the existing solar furnaces are not able to overcome this problem in a satisfactory manner. In this work a solution is proposed based on two paraboloids, a large and a small, both with the same focal point. According to our simulations of geometrical optics, the double reflexion on the two paraboloid surfaces permits to obtain homogeneous flux radiation in a circular central zone with suitable dimensions.

**KEYWORDS:** Solar Furnace Optimization, Solar Flux Homogenizer, Optical Modelling, Ray Tracing Simulations

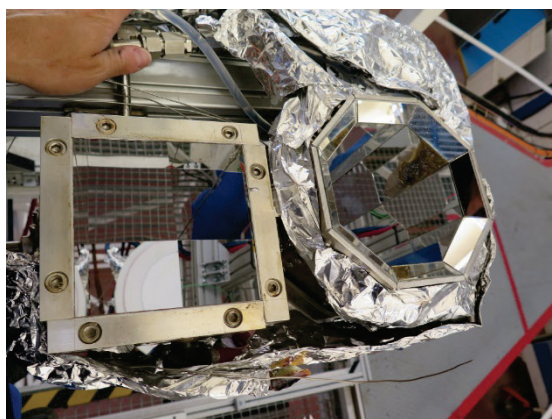
## INTRODUÇÃO

Os concentradores de radiação solar de elevada intensidade (como o SF60 na estação solar de Almería; ver Fig. 1) conseguem obter fluxos de energia muito elevados (até  $3000 \text{ kW/m}^2$ ) a custos de produção muito reduzidos. No entanto, a distribuição radial do fluxo é muito pouco homogênea, apresentando um valor central muito elevado, que decai rapidamente para a periferia (distribuições de Gauss e de Lorentz têm sido utilizadas para simular a variação radial do fluxo, na zona do foco). Esta distribuição muito concentrada do fluxo solar reduz as possíveis utilizações deste tipo de radiação solar, tanto a nível científico (porque as enormes variações radiais de temperatura tornam muito difícil a realização de estudos quantitativos de comportamento térmico) como a nível industrial (porque é difícil obter gradientes térmicos controláveis, nomeadamente para processamento de materiais, quando os fluxos de energia são tão desiguais).

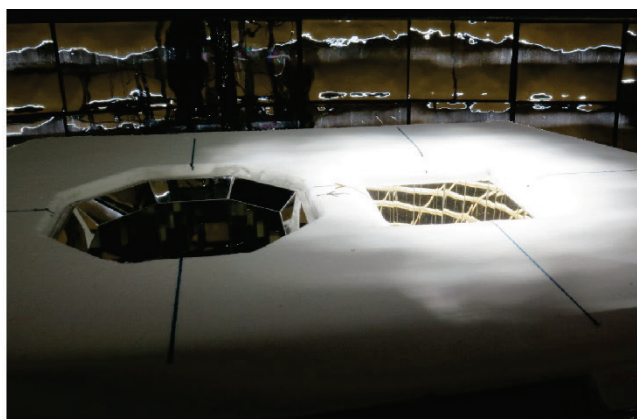


Fig. 1. Fotografia interior do forno solar SF60, mostrando o concentrador (à esquerda) e o espelho plano a  $45^\circ$  (a  $475 \text{ mm}$  do ponto focal), reflectindo a radiação solar concentrada para a região de trabalho por baixo.

A resposta mais habitual para tentar resolver este problema da distribuição não homogênea do fluxo de radiação solar concentrada obtida em fornos solares tem sido a utilização de homogeneizadores (Fig. 2), que através de múltiplas reflexões especulares misturam a radiação incidente, originando uma radiação à saída mais homogênea.



(a)



(b)

Fig. 2. Homogeneizadores com quatro e oito faces, vistos de topo (a) e sujeitos a radiação solar concentrada, protegidos por manta de Zircónia (b).

A Fig. 3 apresenta resultados experimentais obtidos no forno SF60 e descritos em artigo recente (Pereira et al., 2020). Os resultados mostram que: 1) o mapa de radiação é mais homogêneo quando se utiliza o homogeneizador, passando o coeficiente de variação CV (razão entre a média e o desvio padrão) de 0.16 para 0.09; 2) o homogeneizador aumenta o desalinhamento do feixe, com o pico de intensidade quase na extremidade da zona medida; 3) a intensidade do fluxo é maior quando se utiliza o homogeneizador, porque o homogeneizador tende a colectar e a orientar radiação que de outro modo não seria medida.

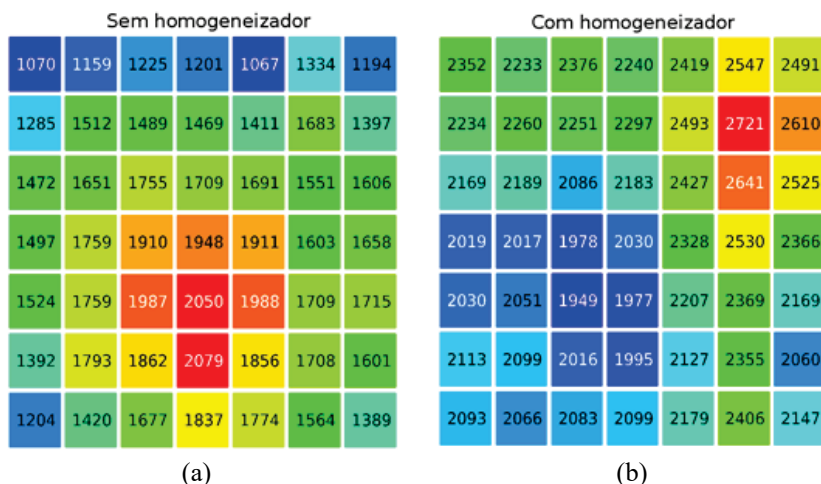


Fig. 3. Fluxos de energia (em kW/m<sup>2</sup>) para o forno solar SF60, em Almeria, Espanha, medidos sem (a) e com (b) homogeneizador.

Os problemas de resistência térmica que estes homogeneizadores colocam juntamente com os desalinhamentos produzidos, aliados a uma modesta homogeneização do feixe incidente, mostram que é necessário procurar melhores soluções para o problema da não homogeneização da radiação solar concentrada obtida em fornos solares.

#### CONCENTRADORES SOLARES COM DOIS PARABOLÓIDES

Uma solução que parece muito promissora, apresentada na Fig. 4, consiste em utilizar concentradores solares com dois parabolóides, exactamente com o mesmo ponto focal (Martins, 2016): um parabolóide grande P1 concavo que colecta a radiação solar e um parabolóide pequeno P2 que a reflecte para a zona de trabalho, que pode ser concavo ou convexo. De acordo com as nossas simulações de óptica geométrica do tipo Monte Carlo *ray tracing* (Pereira et al., 2019; Pereira et al., 2020), esta montagem permite obter radiação homogénea numa região central circular com dimensões significativas (que dependem apenas das dimensões escolhidas para o sistema), essencialmente com o mesmo fluxo e a mesma potência total dos concentradores com apenas um parabolóide (desprezando perdas por reflexão, em geral muito reduzidas). Neste trabalho apresentam-se os resultados mais importantes obtidos com estas simulações, para quatro casos diferentes: 1) condições geométricas perfeitas, com raios paralelos; 2) condições geométricas imperfeitas, com raios paralelos; 3) condições geométricas perfeitas, com raios não-paralelos (desvio máximo dos raios solares = 0.267°); 4) condições geométricas perfeitas, com raios não-paralelos calibrados (para imitar a intensidade relativa dos raios solares, em função do desvio angular).

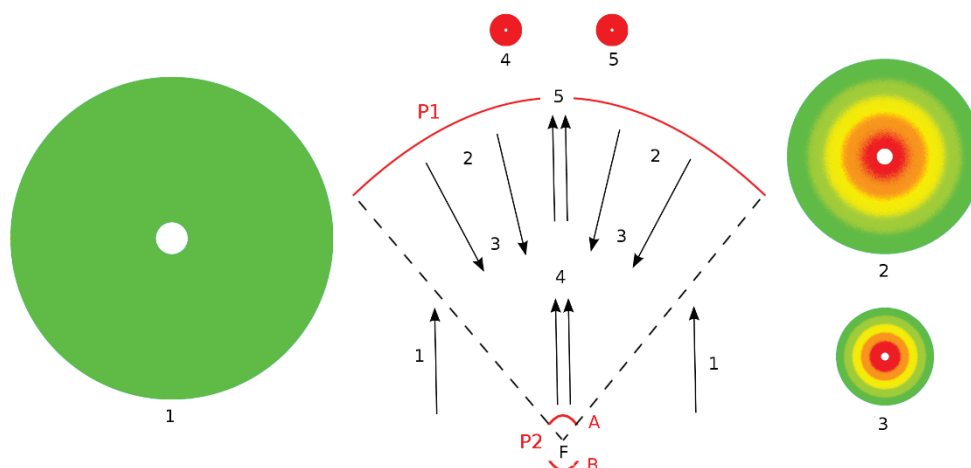


Fig. 4. Esquema de concentrador solar com dois parabolóides, com o mesmo ponto focal F, mostrando-se os fluxos de energia inicial assumindo raios paralelos (1), após a primeira reflexão (2 e 3), e após a segunda reflexão (4 e 5). O segundo parabolóide pode ser convexo (desenho A) ou côncavo (desenho B). As cores variam entre o azul (fluxo baixo) e o vermelho (fluxo elevado).

### Raios Paralelos

Com o intuito de analisar a evolução do feixe de radiação à saída, após a reflexão no parabolóide P2, utilizaram-se quatro detectores igualmente espaçados D1, D2, D3 e D4 nas simulações por ray-tracing, como se mostra na Fig. 5. Os detectores D1 e D2 estão antes do parabolóide P1, enquanto que os detectores D3 e D4 estão depois da abertura (furo circular) nesse parabolóide, por onde os raios passam a caminho da zona de trabalho.

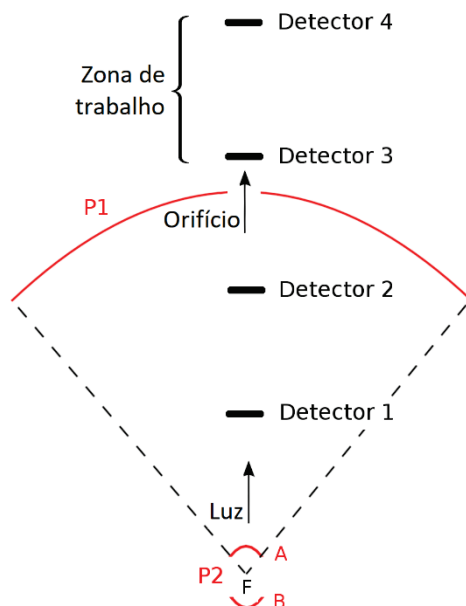


Fig. 5. Dispositivo com dois parabolóides e quatro detectores igualmente espaçados, para seguir a evolução do feixe à saída do parabolóide pequeno P2 até passar pelo parabolóide grande P1 e entrar na zona de trabalho, em que o feixe pode ser usado.

Neste trabalho assumimos a configuração apresentada na Fig. 5 com o parabolóide mais pequeno (P2) na forma A, i.e., a superfície reflectora do parabolóide P2 é convexa. Como se disse anteriormente, a condição essencial para se obter um fluxo homogêneo é que os dois parabolóides (o maior e o menor) tenham o mesmo ponto focal (F). Neste estudo considerámos que o ponto focal se localiza na coordenada  $z = 0$ , o parabolóide menor P2 situa-se a  $z = 100$  mm e o parabolóide maior P1 está a  $z = 1000$  mm. Considerámos ainda que o ângulo máximo exterior (*rim angle*) dos reflectores parabolóides é  $45^\circ$ .

Através do software de *ray tracing* que desenvolvemos, podemos avaliar o que acontece se alterarmos os vários parâmetros geométricos da montagem. No primeiro exemplo estudamos o que acontece quando a distância entre os dois parabolóides é aumentada 1 mm, relativamente à distância perfeita. Os resultados obtidos apresentam-se na Fig. 6 para os quatro detectores D1, D2, D3 e D4. As curvas a azul correspondem à geometria correcta, enquanto que as curvas a vermelho correspondem à geometria não correcta, i.e., considerando P2 a  $z = 99$  mm, em vez de  $z = 100$  mm. Neste último caso, verifica-se que todos os raios que vêm do parabolóide P1 são recebidos e reflectidos pelo parabolóide P2 sem se usar a região (bordo) mais exterior de P2. O feixe resultante da reflexão em P2 já não é perfeitamente homogêneo e já converge ligeiramente, sendo progressivamente mais concentrado da periferia para o centro. Neste caso não ocorre perda de energia radiante uma vez que todos os raios passam através do orifício circular existente no parabolóide P1 e atingem os detectores D3 e D4.

No segundo exemplo estudamos o que acontece quando a distância entre os dois parabolóides é diminuída 1 mm, ou seja, quando P2 está a  $z = 101$  mm, em vez de  $z = 100$  mm. Neste caso, os perfis radiais obtidos através das simulações por *ray tracing* estão representados na Fig. 7. Devido à diminuição da distancia entre os dois paraboloides P1 e P2, neste caso 1.7% dos raios vindos do parabolóide P1 já não atingem o parabolóide P2 (passam fora dele). Mais ainda, o feixe resultante da reflexão em P2 passa a ser ligeiramente divergente. Uma proporção significativa (12.2%) dos raios já não consegue passar pelo orifício circular existente no parabolóide P1 e choca contra o seu bordo, i.e., 12.2% dos raios iniciais chocam com a superfície de P1 que circunda o orifício. No entanto, um simples aumento de 10 mm no raio do orifício é suficiente para ultrapassar este problema, e tal solução implica uma perda de apenas 0.2% da área de captação do parabolóide P1.



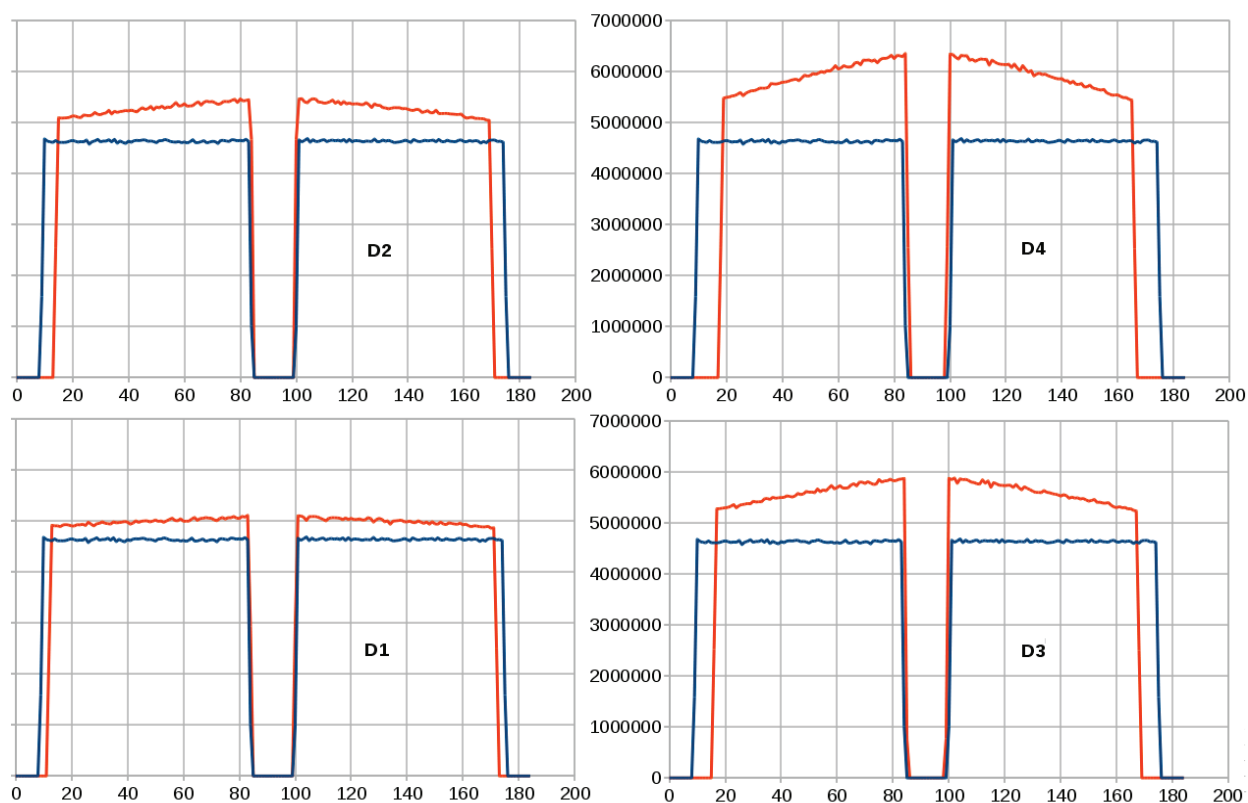


Fig. 6. Perfil de radiação medido nos detectores D1, D2, D3 and D4: em azul para a geometria correcta, em vermelho para P2 a  $z = 99.0$  mm, 1 mm demasiado longe do parabolóide grande P1.

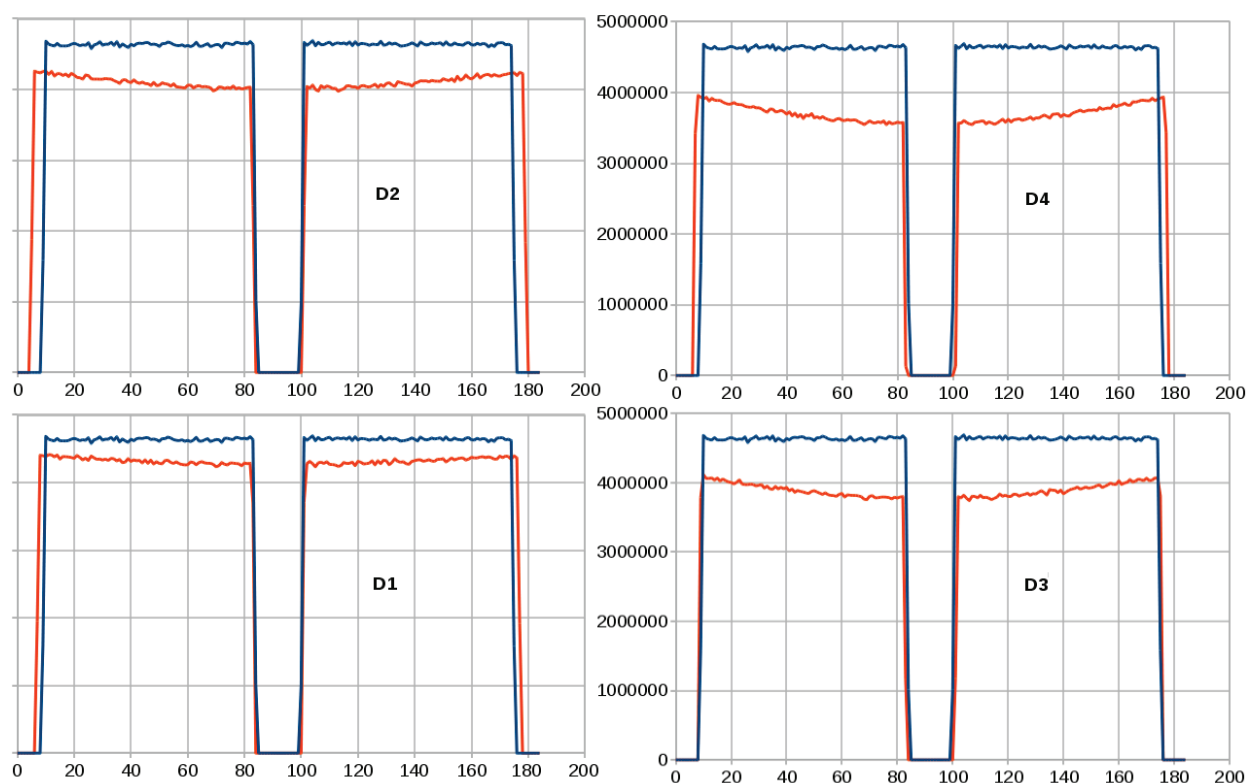


Fig. 7. Perfil de radiação medido nos detectores D1, D2, D3 and D4: em azul para a geometria correcta, em vermelho para P2 a 101.0 mm, 1 mm demasiado perto do parabolóide grande P1.

### Raios Não-Paralelos Igualmente Distribuídos

Até agora temos assumido que os raios solares atingem a Terra perfeitamente paralelos. Contudo, devido ao grande raio do disco do Sol, os raios solares atingem a Terra com um ângulo de inclinação que varia entre  $0^\circ$  e  $0.267^\circ$  (Pereira et al., 2020). Esta pequena inclinação é suficiente para alterar substancialmente o comportamento do dispositivo com dois parabolóides. Como nos casos anteriores, os raios são gerados num círculo de amostragem correspondente à projecção do parabolóide colectador P1. Para além dos 1.0% de raios que se perdem devido à sombra criada pelo parabolóide P2 (como já acontecia com raios paralelos), agora 0.20% dos raios provenientes do helióstato caem fora do parabolóide P1 (são raios provenientes do limite exterior do círculo de amostragem), 2.5% dos raios reflectidos por P1 caem fora do parabolóide P2 (já não existe um único ponto focal) e 21.1% dos raios já não passam através do orifício central existente no parabolóide P1. Esta perda é importante e corresponde a radiação concentrada, que poderia danificar a zona junto ao buraco do parabolóide P1. Aumentando o raio do buraco em 30 mm diminui a radiação concentrada que não passa no buraco para apenas 1.2%. Como o buraco agora é maior que a sombra do parabolóide P2, 0.9% da radiação solar passa directamente pelo buraco, sem ser concentrada. Na Fig. 8 mostram-se os perfis de radiação medidos nos detectores D1, D2, D3 and D4: em azul para raios paralelos, em vermelho para raios não-paralelos mas igualmente distribuídos com origem no disco do Sol. Os detectores D1 e D2 revelam o efeito da sombra de P1, mas para lá do orifício circular o detector D3 já mostra uma distribuição de radiação perfeitamente homogénea na zona central (com um diâmetro de 65 mm) atingindo uma intensidade que é quase igual à obtida com raios perfeitamente paralelos. O diâmetro da zona central homogénea diminui com a distância: passa de 65 mm no detector D3 para apenas 35 mm no detector D4.

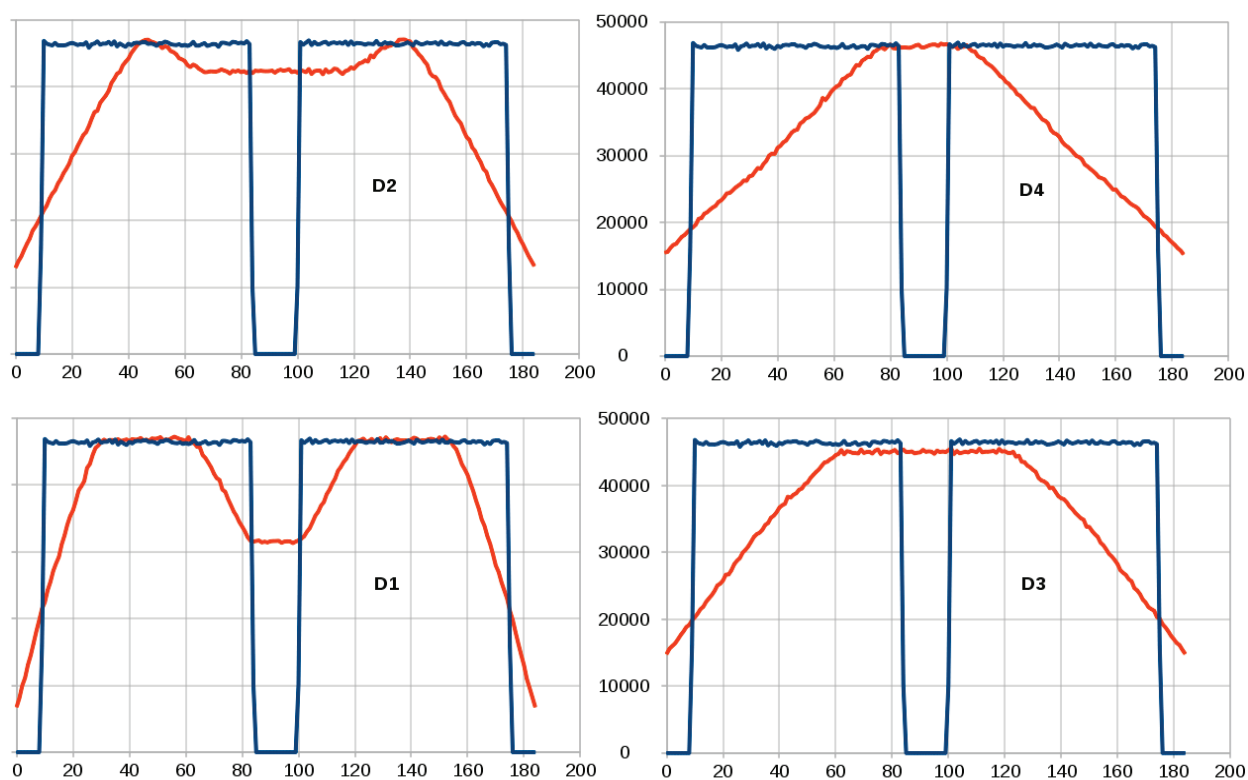


Fig. 8. Perfil de radiação medido nos detectores D1, D2, D3 and D4: em azul para raios paralelos, em vermelho para raios não-paralelos mas igualmente distribuídos.

### Raios Não-Paralelos Calibrados

Na secção anterior assumimos que a distribuição dos raios era perfeitamente homogénea em todos os pontos da superfície solar que ilumina a Terra, que varia entre um ângulo mínimo de  $0^\circ$  e um ângulo máximo de  $0.267^\circ$ . No entanto, os resultados das observações astronómicas revelam que a intensidade dos raios decresce abruptamente próximo da periferia do disco do Sol, de acordo com um perfil radial entre  $r = -raio$  e  $r = +raio$  que é semelhante a uma semi-circunferência (ver: Solar Limb Darkening, 2015). Aplicando o respectivo factor de correcção, podemos constatar que o dispositivo com dois parabolóides altera ligeiramente o seu comportamento conforme se mostra na Fig. 9. Como agora os raios mais inclinados são menos importantes, a intensidade dos raios que caem fora do parabolóide P1 diminui para 0.17% (em vez de 0.20%), os raios reflectidos que caem fora do parabolóide P2 diminuem para 2.2% (em vez de 2.5%) e os raios que não atravessam o orifício central no parabolóide P1 diminuem

para 0.6% (em vez de 1.2%). O diâmetro da zona com concentração homogénea passou a ser de 75 mm (em vez dos 65 mm obtidos com os raios não-calibrados). Junto ao detector D4 a zona central homogénea passou a ser de 40 mm (em vez dos 35 mm obtidos com os raios não-calibrados). As diferenças entre os resultados obtidos para os dois modelos de raios não-paralelos (representando casos extremos) são relativamente pequenas, parecendo indicar que os resultados das medições reais efectuadas com radiómetros não deverão ser muito diferentes dos resultados das simulações por nós realizadas.

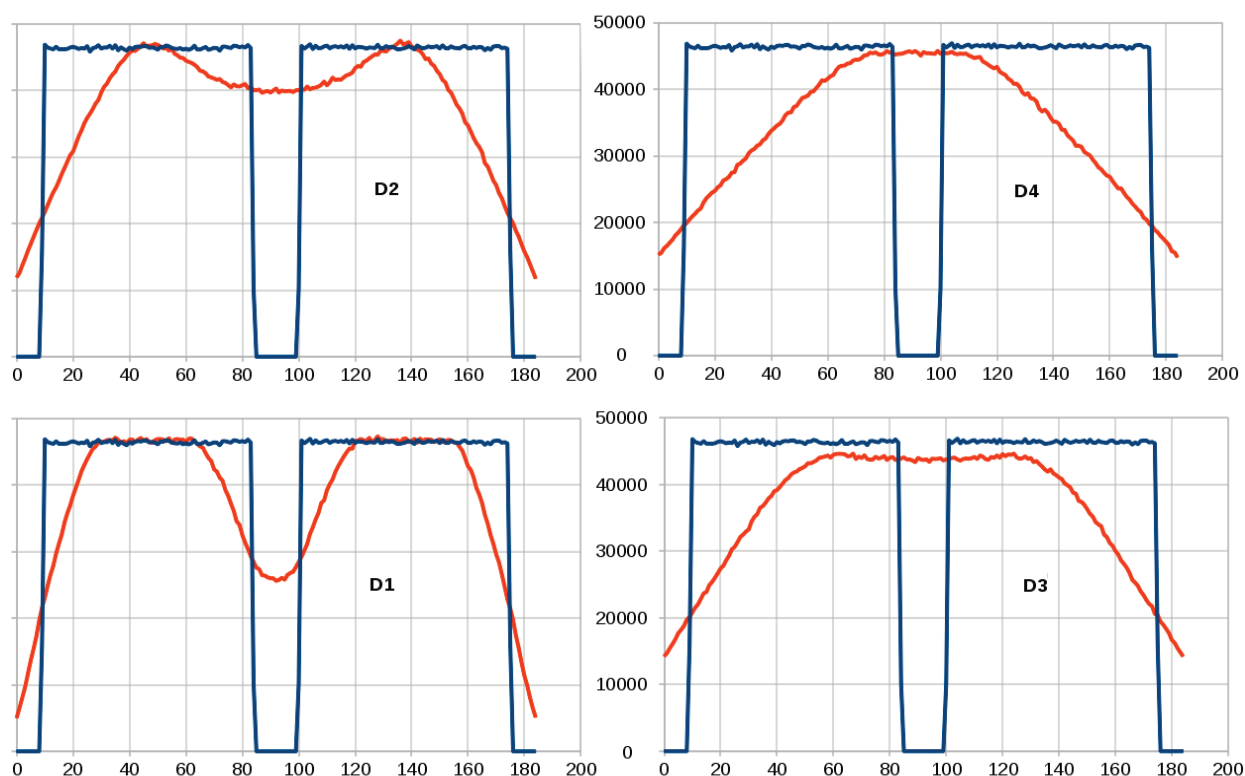


Fig. 9. Perfil de radiação medido nos detectores D1, D2, D3 and D4: em azul para raios paralelos, em vermelho para raios não-paralelos, calibrados de acordo com o perfil de uma semi-circunferência (intensidade máxima no centro, onde os raios são paralelos, intensidade nula na periferia onde a inclinação dos raios vale  $0.267^\circ$ ).

A Fig 9 possibilita ainda a comparação directa entre o perfil radial de radiação no caso de condições geométricas perfeitas, com raios paralelos (a azul) e no caso de condições geométricas perfeitas, com raios não-paralelos calibrados (a vermelho). A intensidade da radiação na zona central, medida pelo detector D3, é cerca de 6.8% inferior, com raios não-paralelos calibrados, à obtida com raios paralelos. Esta perda de energia é muito pequena, principalmente quando se consideram os enormes fluxos de radiação produzidos e o carácter essencialmente gratuito da radiação solar. Os resultados obtidos parecem indicar que este sistema com dois parabolóides pode ser uma boa solução para a falta de homogeneidade na radiação colectada nos actuais fornos solares de elevada intensidade.

## CONCLUSÕES

Obter radiação solar concentrada que seja suficientemente homogénea numa região central suficientemente grande para poder ser utilizada para fins industriais ou científicos, é um objectivo que ainda não foi atingido. Na melhor das hipóteses, consegue-se obter uma distribuição quase gaussiana ou lorentziana para o fluxo da radiação concentrada, muito longe da homogeneidade pretendida.

Homogeneizadores têm sido frequentemente utilizados para tentar distribuir a radiação concentrada de forma mais homogénea, mas estes dispositivos danificam-se facilmente e os resultados são apenas satisfatórios.

Uma possível solução é construir um dispositivo com dois parabolóides, como reportado neste trabalho, em que os efeitos das duas reflexões se compensam, produzindo radiação à saída que é absolutamente homogénea numa região

central de dimensões apreciáveis (que dependem apenas da geometria escolhida) se os raios forem paralelos e o dispositivo for mecânicamente perfeito.

A grande desvantagem deste dispositivo é ser muito sensível à precisão mecânica da sua construção e ao paralelismo dos raios provenientes do Sol. Por esta razão e porque há diversos parâmetros geométricos cuja influência ainda não foi suficientemente estudada (como o ângulo de abertura, a razão entre as distâncias focais dos dois parabolóides, o tamanho do buraco no parabolóide P1) parece aconselhável prosseguir com a realização de mais simulações em computador antes de tentar construir este dispositivo.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores foram beneficiários da rede de equipamentos solares "Solar Facilities for the European Research Area" (SFERA) através do programa SFERA-II (EU Project Grant Agreement no. 312643) que lhes permitiu uma campanha de testes no CIEMAT-PSA, fornalha solar SF60, em Julho de 2017. Este trabalho foi também financiado pelo projeto INSHIP (Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes) [www.inship.eu](http://www.inship.eu) e pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal, através do IDMEC - Instituto de Engenharia Mecânica (Pólo IST) integrado no LAETA (projecto UIDB/50022/2020). Agradecemos também a Guilherme de Almeida a leitura atenta e as críticas construtivas do nosso trabalho, nomeadamente a importância de realizar estudos com raios não-paralelos.

#### REFERÊNCIAS

- Martins C.A.B. (2016). Aparelho Concentrador e Estabilizador de Raios Solares e Sistema de Transmissão de um Feixe de Raios Solares Concentrados e Estabilizados que o Contém. Pedido de patente nacional PT20160109071. Disponível online em: [https://pt.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=pt\\_pt&FT=D&date=20170704&CC=PT&NR=109071A&KC=A](https://pt.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=pt_pt&FT=D&date=20170704&CC=PT&NR=109071A&KC=A) (acedido em 18 Agosto 2020).
- Pereira J.C.G., Fernandes J.C. and Rosa L.G. (2019). Mathematical Models for Simulation and Optimization of High-Flux Solar Furnaces. *Math. Comput. Appl.* 24, 65. <https://doi.org/10.3390/mca24020065>
- Pereira J.C.G., Rodríguez J., Fernandes J.C. and Rosa L.G. (2020). Homogeneous Flux Distribution in High-Flux Solar Furnaces. *Energies* 13, 433. <https://doi.org/10.3390/en13020433>
- Solar Limb Darkening (2015). Disponível online em: <http://exoplanet-diagrams.blogspot.com/2015/07/solar-limb-darkening.html> (acedido em 18 Agosto 2020).